

Д. Ю. Демежко, А. А. Горностаева, А. Д. Коноплин, И. В. Глазачев

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

ТЕПЛОВАЯ АКТИВНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД КАК ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР: ИЗМЕРЕНИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

Петрофизическая (теплофизическая) характеристика, определяющая способность горных пород к теплообмену с окружающей средой, называется *тепловой активностью* (*thermal effusivity*) [Лыков, 1978]. Иногда используется и другой термин – *тепловая инерция* (*thermal inertia*). Тепловую активность E можно определить и через другие, более «традиционные», теплофизические параметры – теплопроводность (λ), температуропроводность (a) и объемную теплоемкость (ρC) – как: $E = \sqrt{\lambda \rho C} = \lambda / \sqrt{a} = \rho C \sqrt{a}$ [Дж·м⁻²·К⁻¹·с^{-1/2}]. Такие комбинации «традиционных» теплофизических характеристик нередко возникают в нестационарных задачах геотермии, однако почти никогда они не идентифицируются как самостоятельная теплофизическая характеристика, тепловая активность. Соответственно при вычислениях приходится использовать имеющиеся оценки теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости, полученные разными методами и на различных образцах, что вносит дополнительные погрешности. В докладе рассмотрен ряд задач геотермии, в которых тепловая активность выступает как самостоятельная петрофизическая характеристика и описан программно-аппаратный комплекс для прямых измерений тепловой активности образцов горных пород, разработанный в Институте геофизики УрО РАН.

Перечислим некоторые процессы, динамика которых определяется тепловой активностью.

1. Внедрение интрузивного тела в осадочные породы. В первом приближении эту задачу можно свести к теплообмену двух полуограниченных тел с различной температурой. Несмотря на нестационарность процесса теплообмена, контактная температура в течение длительного периода будет сохраняться постоянной и зависит от разности температур двух тел и соотношения их тепловых активностей. В свою очередь, температура вблизи контакта определяет тип и интенсивность процесса контактового метаморфизма.

2. Теплообмен в активном слое горных пород играет существенную роль в формировании подземного поля температур. Описывая процесс распространения гармонических температурных колебаний с поверхности в глубину часто используют упрощенную модель однородной среды с постоянной температуропроводностью. Применение этой модели в гетерогенных средах предполагает введение «кажущейся температуропроводности» [Pollack et al., 2005; Sergienko et al., 2008]. Рассчитанная на основе данных температурного мониторинга кажущаяся температуропроводность может меняться в пределах нескольких порядков, что не соответствует реальной изменчивости этой характеристики. В докладе показано, что в тепловом режиме приповерхностной части горных пород существенную роль играют неоднородности тепловой активности, связанные с переменным режимом увлажнения/высыхания.

3. Климатические процессы. Исследованиям температурного отклика Земли на внешнее радиационное воздействие (инсоляция, солнечная активность, парниковый эффект, экранирование излучения вулканическими аэрозолями и др.) традиционно уделяется большое внимание в климатологии. Однако, в большинстве климатических моделей этот процесс существенно упрощают, ограничивая область взаимодействия литосферы с атмосферой тонким слоем пород с некоторой эффективной теплоемкостью [Stevens et al., 2007; MacDougall et al., 2010]. В этом случае температурная реакция на внешнее воздействие проявляется практически мгновенно, что противоречит данным наблюдений и климатическим реконструкциям. Напротив, если не ограничивать область взаимодействия и рассматривать литосферу как полупространство, то окажется, что соотношение амплитуд изменений температуры земной поверхности и теплового потока (пропорционального внешнему форсингу) определяется тепловой активностью горных

пород. При этом запаздывание температурной реакции вовсе не зависит от тепловых свойств. Так, для гармонических колебаний оно составляет $1/8$ периода.

Еще одно важное приложение этой задачи связано с разработкой методов реконструкции истории изменения теплового потока через земную поверхность на основе данных скважинной геотермии [Beltrami, 2001; Beltrami et al., 2002]. Особенно актуальны реконструкции долговременных изменений теплового потока – за десятки тысяч лет – по данным термометрии глубоких скважин [Demezhko et al., 2013; Демежко, Горностаева, 2014]. Они позволяют сопоставить масштаб и хронологию изменений теплового потока с изменениями инсоляции, обусловленными орбитальными факторами (т.н. циклами Миланковича), и, в конечном итоге, – лучше понять функционирование климатической системы.

4. Дистанционные зондирования Земли и планет. Определяющая роль тепловой активности в температурном отклике поверхности Земли и других планет на суточные вариации теплового потока лежит в основе методов дистанционного (космического) зондирования [Price, 1977; Mellon, Putzig, 2007]. По разности дневных и ночных радиационных температур с учетом альбедо можно оценить тепловую активность, которая, в свою очередь, определяется типом пород, их увлажненностью, характером растительности и т.д. Данные прямых измерений тепловой активности природных сред могут служить для калибровки методов дистанционного теплового зондирования.

Прямое измерение тепловой активности реализуется принципиально проще измерений «традиционных» теплофизических параметров. Поскольку тепловая активность, в отличие от тепло- и теплопроводности, определяет динамику теплообмена между телами – нет необходимости в разработке специальных мер для устранения влияния датчика (установки) на результаты измерений. Напротив, контролируя процесс теплообмена с материалом датчика, можно оценить тепловую активность контактирующего с ним образца. Предложенный нами способ основан на возбуждении плоских температурных волн на поверхности эталонной пластины, контактирующей с исследуемым материалом, и измерении температурных колебаний в пластине на разных расстояниях от источника [Демежко, 2011, Демежко и др., 2011, 2012]. Способ реализован в программно-аппаратном комплексе для измерения тепловой активности, включающем:

1. датчики тепловой активности, состоящие из корпуса, эталонной пластины, выполненной из различных материалов (фторопласт, оптическое стекло, кварц, сапфир), плоского нагревателя и двух термодатчиков K -типа, вмонтированных в эталонную пластину;
2. цифрового двухканального термометра термодатчиков;
3. блока питания;
4. коммутирующего устройства, обеспечивающего интерфейс термометра с компьютером и управление режимом нагревания;
5. компьютера с программным обеспечением, позволяющим управлять процессом измерения и рассчитывать тепловую активность образца.

Исследования выполнены в рамках Программы УрО РАН №18. "Фундаментальные закономерности геологического развития Урала и прилегающих территорий", проект "Разработка петрофизических методов исследований горных пород с целью изучения глубинного строения и развития земной коры Урала".

Литература

- Лыков А.В. Теплообмен. – М.: Энергия, 1978, 480 с.
- Демежко Д.Ю. Измерение тепловой активности твердых материалов контактным методом / Приборы и техника эксперимента, 2011, № 6, С. 127–132.
- Демежко Д.Ю., Дергачев В.В., Рыбаков Е.Н. Контактный метод определения тепловой активности твердых материалов / Измерительная техника. М., 2011, № 10. С.34–36.
- Демежко Д.Ю., Дергачев В.В., Климишин А.В. и др. Патент РФ № 2462703 на изобретение «Способ определения тепловой активности материалов и устройство для его осуществления». Приоритет изобретения 19.07.2010. опубликовано 27.09.2012, бюлл. №27.

Демежко Д.Ю., Горностаева А.А. Реконструкции долговременных изменений теплового потока через земную поверхность по данным геотермии глубоких скважин. / Геология и геофизика, 2014, Т.55, № 12, С. 1841–1846.

Beltrami H. Surface Heat Flux Histories from Geothermal Data: Inferences from Inversion. / Geophys. Res. Lett., 2001, 28(4), P. 655–658.

Beltrami H., Smerdon J., Pollack H. et al. Continental heat gain in the global climate system. / Geophys. Res. Lett., 2002, V. 29, No. 8, P. GL014310.

Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Tarkhanov G.V. et al. 30,000 years of ground surface temperature and heat flux changes in Karelia reconstructed from borehole temperature data. / Bulletin of Geography. Physical Geography Series, Versita Publishing, 2013, No. 6, P. 7–25.

MacDougall A.H. et al. Comparison of observed and general circulation model derived continental subsurface heat flux in the Northern Hemisphere / Journal of Geophysical Research, 2010, V. 115, No. D12, P. D12109.

Mellon, M.T.; Putzig, N.E. The Apparent Thermal Inertia of Layered Surfaces on Mars / 38th Lunar and Planetary Science Conference, (Lunar and Planetary Science XXXVIII), held March 12–16, 2007 in League City, Texas. LPI Contribution No. 1338, P.2184.

Pollack, H.N., J.E. Smerdon, and P.E. van Keken. Variable seasonal coupling between air and ground temperatures: A simple representation in terms of subsurface thermal diffusivity / Geophys. Res. Lett., 2005, V. 32, P. L15405.

Price, J.C. Thermal inertia mapping: A new view of the Earth: / Journal of Geophysical Research., 1977, V. 82, P. 2582–2590.

Sergienko O.V., MacAyeal D.R., Thom J.E. Reconstruction of snow/firn thermal diffusivities from observed temperature variation: application to iceberg C16, Ross Sea, Antarctica, 2004–07. / Annals of Glaciology, 2008, V. 49, P. 91–95.

Stevens M.B. et al. Effects of bottom boundary placement on subsurface heat storage: Implications for climate model simulations / Geophysical Research Letters, 2007, V. 34, No 2. P. L02702.